

# GIS 局部放电检测用宽频带超高频天线的研究与应用

张小勇， 王建生， 孙晓滨

(西安高压电器研究所, 710077 西安)

**摘要：**对 GIS 来说，局部放电测量是发现绝缘隐患的有效手段。本文介绍了一种可用于 GIS 局部放电检测的基于阿基米德平面螺旋线原理的宽频带超高频天线的研究设计过程，经过测量，在 500MHz 至 1500MHz 的范围内，驻波比小于 2。在此基础上结合 GIS 的产品结构，建立了 GIS 局部放电用超高频测量系统，并将其应用于实际 GIS 产品的局部放电测量，经过与传统的耦合电容法的比较，结果显示基于此超高频天线的测量系统能测到局放量小达 3pC 的局部放电量，具有较高的灵敏度。

**关键词：**GIS， 局部放电， 超高频， 天线

## 1 前言

气体绝缘开关设备（GIS）由于具有诸多优点已经被广泛地应用于高压及超高压电力系统中。从 GIS 近 50 年的运行经验来看，绝缘故障始终是影响 GIS 长期可靠性的重要因素之一。对 GIS 来说，局部放电测量是发现绝缘隐患的有效手段。对 GIS 的局部放电测量来说，耦合电容法是比较好的方法，但是受现场条件的限制，此方法不可能应用到现场的 GIS 上。这样一来，就需要研究其它的可用于现场 GIS 局部放电测量的方法。超高频法用于电力设备的局部放电测量已经有数十年的历史，此法对于 GIS 中的局部放电测量尤其有效<sup>[1]</sup>。很多的国家都对此方面做了大量的研究，例如：英国、德国、日本、中国等。超高频技术的原理是：产生局部放电的电流脉冲上升沿时间极短，可在 GIS 中激发出持续时间远大于脉冲宽度的大量超高频（频率在 300MHz 到 3GHz 之间）电磁波信号，且其持续时间可达微秒级<sup>[2]</sup>。GIS 内绝缘缺陷的局部放电产生的超高频电磁波信号可通过安装在 GIS 内的超高频天线进行测量，然后经过传输、放大送入频谱仪及计算机，最后采用软件进行分析统计，就可以得到不同绝缘缺陷的特征频谱。由此可见，宽频带的超高频天线的性能对 GIS 局部放电的超高频测量至关重要；还有就是如何在不影响 GIS 的性能及密封的前提下将天线装配到 GIS 产品上。

## 2 天线的设计

### 2.1 天线的设计原理

本文中所使用的天线为内置式天线，采用阿基米德平面螺旋线原理制作而成。由天线理论可知，如果天线以任意比例变换后仍等于它原来的结构，那么他的电性能将与频率无关，即为非频变天线，如果天线的结构满足角度条件，即完全由角度决定，当角度变化时可得到连续的缩比天线<sup>[3]</sup>。若将天线的终端部分截尾，对天线的电性能没有显著的影响，则有限尺寸的天线就可以在相当宽的频带范围内具有非频变天线的电性能。螺旋天线是根据无限长天线设计出的仅由角度表征其特征的天线，并且天线电流在离开馈电点时逐渐减小，因此在电流足够小处把天线截断将不会影响其频带特性<sup>[4]</sup>。这种天线通常由双臂阿基米德螺线组成，

其具有宽频带、圆极化、尺寸小、可以嵌装等优点<sup>[5]</sup>，如图 1 所示。螺线的极坐标方程为：

$$r = r_0 + a\varphi \quad (1)$$

式中， $r$  为矢径， $r_0$  为起始矢径， $a$  是螺线增长率（常数）， $\varphi$  是幅角以弧度表示。

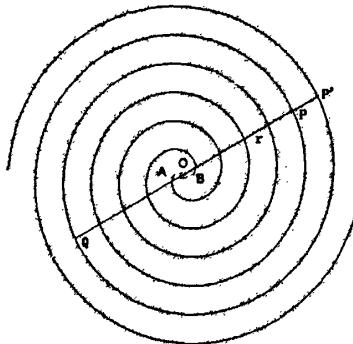


图 1 阿基米德螺旋天线示意图

若对该天线始端的 A、B 两点进行平衡馈电，则从 A 点沿一条螺线绕至 P 点的长度，等于从 B 点沿另一条螺线绕至 Q 点的长度，P、Q 两点同在以 O 为圆心、 $r=OP$  为半径的圆周上，但是 P、Q 两点的相位是相反的。当相邻两点 P、P' 的间距  $PP'=\Delta r$  很小时，则从 P 点沿螺线到 A 点的长度，与从 P' 点沿另一条螺线到 B 点的长度相差约半个周长即  $QP \approx \pi r$ ，这样，PP' 两点电流的相位差为  $\pi + (2\pi/\lambda) \cdot \pi r$ 。如果  $r=\lambda/2\pi$ ，则两点间的相位差变为  $2\pi$ ，即 P、P' 两点具有相同的电流。由于相邻两线上的电流相同，在天线平面的法线方向上形成最大辐射。也就是说周长约为一个波长的那些环带，就形成平面螺旋天线的主要辐射带或称有效辐射区。当频率改变时，有效辐射区随之变动，但方向图基本不变，就有宽带特性。

## 2.2 天线的设计过程

限制天线带宽的因素主要有以下几点：方向图带宽、增益带宽及阻抗带宽。对本研究工作中用来测量 GIS 局部放电产生的超高频电磁波的天线来说，因为天线在 GIS 中的安装位置是固定不变的，其方向也就不变，因此就不存在方向图带宽的问题，也就不存在方向增益的问题，即增益带宽的问题。所以对用于 GIS 局放超高频信号测量的天线来说，主要关心的是天线的阻抗带宽。

天线的阻抗带宽可以用馈线上的驻波比来规定，以驻波比低于某一规定值时的频带宽度定为该天线的阻抗带宽。这种表示方法，既反映了天线阻抗的频率特性，也说明了天线与馈线的匹配效果。

按照上节所述的设计原理，选择敷铜板作为超高频天线的载体，使用相关技术制作此天线。天线各项参数的选择过程如下：

### 1) 螺线外径的选择

由天线设计手册可知，此时螺线的外径值取决于天线下限工作频率的波长，即满足式(2)：

$$D \geq \frac{1.25\lambda_{\max}}{\pi} \quad (2)$$

其中:  $\lambda_{\max}$  为下限工作频率的波长;

$D$  为螺线的外径。

这里取下限工作频率为 500MHz, 由式 (3) 经计算可得到  $\lambda_{\max}$  的值:

$$\lambda_{\max} = \frac{v}{f} = 600\text{mm} \quad (3)$$

其中:  $v$  为波速, 取  $3 \times 10^8\text{m/s}$ ;

$f$  为下限工作频率, 取 500MHz。

将  $\lambda_{\max}$  的值代入式 (2) 中可计算得出螺线外径  $D$  的最小值为 239mm。根据此结果, 选用了直径为 240mm 的敷铜板作为天线的载体。

## 2) 螺线内径的选择

螺线的内径即为图 1 中的馈电点 A、B 之间的间距, 其值为  $2r_0$ 。此间距的值必须满足式 (4) 的要求:

$$2r_0 < \frac{\lambda_{\min}}{4}, \text{ 即 } r_0 < \frac{\lambda_{\min}}{8} \quad (4)$$

其中:  $r_0$  为起始矢径;

$\lambda_{\min}$  为上限工作频率的波长, 此时取上限工作频率为 1.5GHz。

按照式 (3)、(4) 可计算得出  $r_0$  的最大值为 25mm。实际制作天线时选取的  $r_0$  的值为 6mm。

## 3) 螺线圈数的选择

螺线圈数的选择实际为螺线增长率  $a$  的选择。增长率  $a$  越小, 螺线的曲率越大, 则绕的圈数越多, 终端效应越小。但是圈数过多会造成传输损耗增大, 最后取每臂的圈数为 5 圈。

## 4) 螺线宽度的选择

制作天线的金属螺线选用的材料为铜, 且螺线的宽度等于两条螺线间的间隔宽度, 这样就可以形成互补结构, 有利于阻抗的宽带特性。

按照以上各种参数, 设计并制作了超高频天线, 天线本体及装配的实物照片如图 2 所示。

## 2.3 天线的性能测量

用于 GIS 中的超高频天线的一个非常重要的性能测量就是其驻波比的测量。天线的驻波比 (SWR) 响应特性<sup>[6]</sup>用来表征超高频天线的频率响应和输入阻抗, 它是反映天线性能的

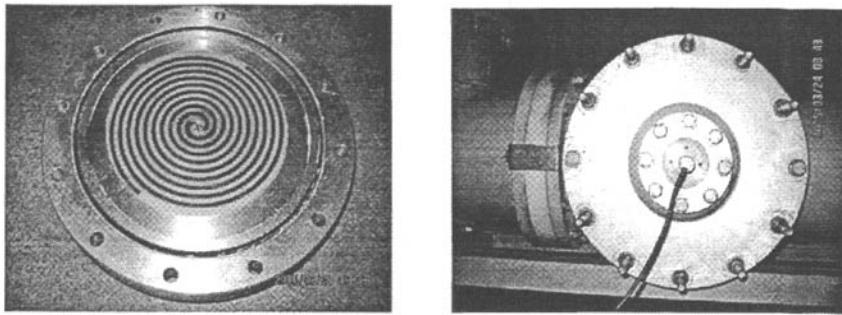


图 2 天线本体及装配后的实物照片

关键参数。由电磁波的理论可知,当驻波比小于 2 时可不考虑驻波的影响。用 54147A 标准网络分析仪测得本研究工作中的天线的驻波特性如图 3 所示。测量结果显示:在 500MHz 到 1.5GHz 的范围内,此天线的驻波比均小于 2, 可满足超高频信号的测量。

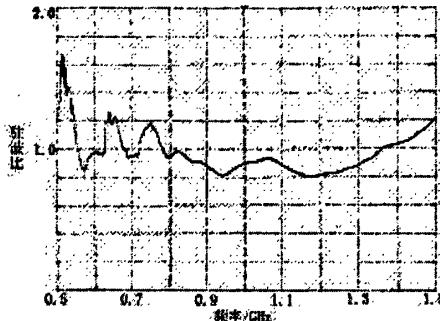


图 3 超高频天线驻波比测量结果

### 3 基于超高频天线的测量系统

用于 GIS 局部放电测量的超高频测量系统如图 4 所示。此系统中所用的放大器的增益为 30dB, 频带范围为 0-2.0GHz。所用的频谱分析仪频带范围为 0-1.8GHz。试验时, 由超高频传感器拾取局部放电产生的超高频电磁波信号, 经过放大器放大后输入到频谱分析仪。频谱仪和计算机之间通过 GPIB 数据电缆连接, 从而计算机可以控制频谱仪进行数据采集及从频谱仪提取数据。电源电压经过分压器变为低压信号输入到外触发电路, 在工频“0”相位的时候, 触发电路触发频谱仪开始采样, 就可以得到放电频谱和电源相位的关系。

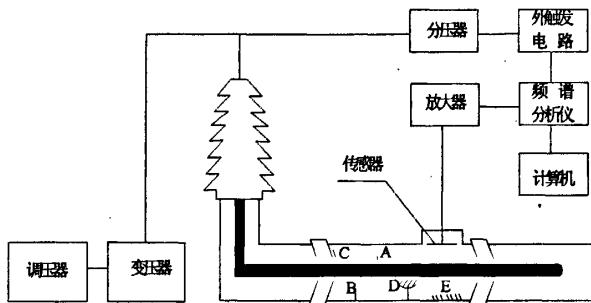


图 4 超高频局放测量系统

#### 4 在实际 GIS 产品上的应用

在一台实际的 126kV GIS 产品上用两种不同的方法进行了局部放电测量。

##### 4.1 耦合电容法

在西高所高压实验室进行了以下测量。试验前首先测量了试验回路的背景局放量，既就是保持试验回路不变，仅脱开试品，在 500kV 工频电压下，回路自身的背景局放量为小于 0.3pC。然后接入试品，按标准施加电压所测得的局放量为 3pC。图 6 给出了局放仪上所显示的局放波形。局放仪为 LEMKE DIANOSTICS GmbH 生产的 LDS-6 型局部放电检测仪。

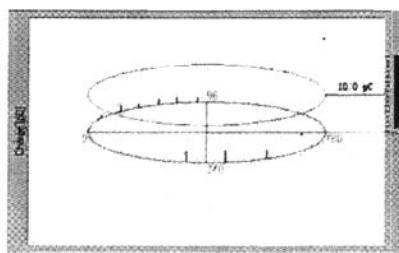


图 5 局放仪所测到的局放信号波形

##### 4.2 超高频法

所测得的局部放电信号的频谱如图 7 所示。测量时域波形时选取的中心频率为 1.25GHz。

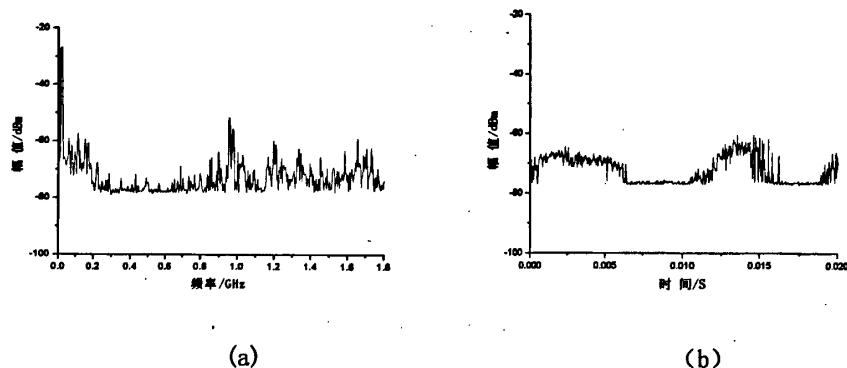


图 6 采用超高频法测量局部放电得到的频谱

(a) 局部放电的频域波形      (b) 局部放电的时域波形

采用局放专家系统诊断软件对局部放电的数据进行统计分析，对于此种放电频谱，诊断其绝缘缺陷的类型为：85%的可能性为绝缘子表面有金属微粒，20%可能为自由金属微粒放电。之后打开 GIS 进行检修发现，在断路器室和隔离开关室之间的绝缘盆子表面发现了少量的金属粉末。

## 5 结论及建议

- 1) 所研制的基于阿基米德平面螺旋线原理的宽频带超高频天线在 500MHz 至 1500MHz 的范围内，驻波比小于 2，可满足 GIS 局部放电超高频信号的测量；
- 2) 本文所开发的超高频测量系统可以测到局放量小达 3pC 的局部放电；
- 3) 超高频法测量 GIS 局部放电可以识别产生局部放电的绝缘缺陷类型；
- 4) 应进一步研究解决如何在不影响 GIS 的性能及密封的前提下将天线装配到 GIS 产品上，尤其是产品的密封问题。

## 参考文献

- [1] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京：水利电力出版社，1994
- [2] 朱德恒，严璋. 高电压绝缘[M]. 北京：清华大学出版社，1992
- [3] 赵家眚，黄尚锐. 电磁场与微波技术[M]. 华中理工大学出版社，1991
- [4] Hikita M, Horiuchi T, Tian Z H, Suzuki H. Study on Mechanisms and Propagation Characteristic of Partial Discharges in SF<sub>6</sub> GIS[C]. Conference Record of International Symposium on High Voltage Engineering 1999:66~69
- [5] 林昌禄等. 天线工程手册[M]. 北京：电子工业出版社，2002
- [6] 王元坤，李玉权. 天线的宽频带技术[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，1995

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>